

Auteur ir. A.H.T.M. (Alet) van den Brink, Kropman Installatietechniek B.V.

## De invloed van een niet-constant drukverschil op de klepselectie

*Vanuit het temperatuurverloop en de hieraan gekoppelde vorm van de warmteafgifte karakteristiek [1] en de bepaling van de "ideale" autoriteit [2] is de uitbreiding gemaakt door de waterintrede- of luchtuitredetemperatuur niet langer constant te veronderstellen [3]. Naast de niet-constante temperaturen, is het ook aannemelijker dat het drukverschil, uitgeoefend door de circulatiepomp, niet-constant is. Dit kan veroorzaakt worden door een pomp met een constant toerental of door een van de moderne pompregelingen. Een voorbeeld van een dergelijke pompregeling is het dalend drukverschil bij een dalend debiet. Maar wat is het effect van het niet-constante drukverschil op de warmteafgifte en hoe hou je hier, indien mogelijk, rekening mee bij de klepselectie? Eerder is ter introductie de huidige kennis met betrekking tot een constant drukverschil toegelicht [4]. In dit laatste artikel in een serie van 6 artikelen wordt de invloed van een niet-constant drukverschil op de klepkeuze en de  $k_v$ -sprong inzichtelijk gemaakt aan de hand van een nieuw gepresenteerde afleiding en diverse voorbeelden.*

Een correct geselecteerde klep is onderdeel van een goed functionerende installatie. Bij de huidige set rekenregels wordt uitgegaan van een constant drukverschil van een circulatiepomp. Echter zover bij de auteur bekend, het effect op de gelijkmatigheid van de vermogensafgifte en klepkeuze is nog niet eerder onderzocht of vertaald in formules of rekenregels voor een niet-constant drukverschil. Het is daarom van belang om inzicht te krijgen hoe een niet-constant drukverschil de klepselectie beïnvloed. Voor een verdere toelichting en introductie wordt verwezen naar een eerder artikel [4].

Het debiet  $Q^*$  [-] bij een klepstand met waarde  $k_v$  [ $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{bar}^{-1/2}$ ], een bekende autoriteit  $A$  [-] en een constant drukverschil wordt berekend met de

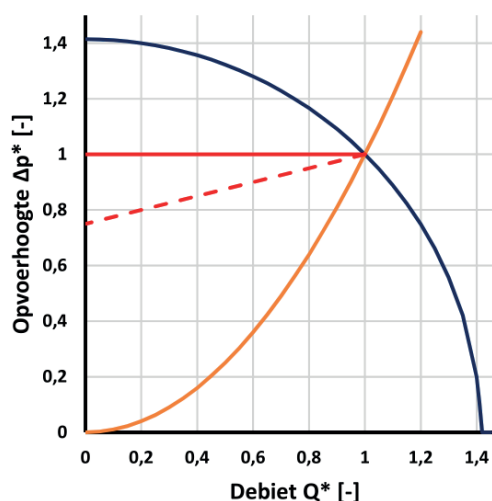
bekende vergelijking (1) [5] waarbij de 1 in de teller ook de waarde van 1,3 kan bezitten [6].

$$Q^* = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)}} \quad (1)$$

Verder is  $k_{vs}$  [ $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{bar}^{-1/2}$ ] de karakteristieke waarde van de volledige geopende klep. Het constante drukverschil is weergegeven in figuur 1 door middel van de rode lijn. De blauwe lijn is een benadering van een pompcurve bij een vast toerental en de oranje lijn is de installatiekarakteristiek. Het snijpunt van de leidingkarakteristiek en de pompcurve in het punt ( $Q^*=1$ ,  $\Delta p^*=1$ ) is het werkpunt. Hierop wordt veelal de pomp geselecteerd. Een voorbeeld van een dalend drukverschil bij een dalend debiet is weergegeven door de rood gestippelde lijn.

De resultaten worden onderling met elkaar vergeleken op basis van de gelijkmatigheid van de vermogensafgifte ten opzichte van een lineaire aansturing. In [1] is aangegeven

**Figuur 1:** Pompcurve (blauw) met aangegeven de installatiekarakteristiek (oranje), een constant drukverschil (rood) en een dalend drukverschil bij een dalend debiet (rood gestippeld)



dat moderne installaties (HT-koeling, LT-verwarming) niet vanzelf voldoen aan de bestaande vuistregels en dat met name de waterzijdige weersafhankelijke regeling  $a^*$  (a cursief ster) laat stijgen [3]. Maar wat betekent een variabel drukverschil nu voor de klepselectie? In dit artikel wordt dit uitgewerkt.

**LET OP:** het is goed om te benadrukken dat alle vergelijkingen in dit artikel bij **EN**  $a^*$  (zoals gebruikt in deze serie artikelen) [1][2][3] **EN** bij a [5][6] (bestaande methode) gebruikt kunnen worden. Dit is mogelijk omdat de vergelijkingen de verhouding tussen klepstand en debiet weergegeven. Ter herinnering, deze benadering(en) is/zijn gemaakt voor een constant waterzijdig debiet en constant luchtzijdig debiet [2]. Hierbij wordt verwezen naar de bekende module 5 [6].

#### Resultaat

De ideale autoriteit is gedefinieerd als de meest gelijkmatige vermogensafgifte bij een lineaire aansturing [2] en een constant drukverschil [3]. Een veranderend drukverschil kan dus invloed hebben op de keuze van de autoriteit en/of op de keuze van de grondkarakteristiek. Bij gedetailleerde berekeningen wordt vanuit de aansturing of lichthoogte van de klep de bijbehorende  $k_v$ -waarde van de klep berekend. De invloed van een variabel drukverschil op het debiet  $Q^*$  [-] als functie van de klepstand wordt berekend met onderstaande vergelijking.

$$Q^* = \frac{\Delta p_0^*}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right) + \Delta p_0^* - 1}} \quad (2)$$

De afleiding is gegeven in het intermezzo. Deze vergelijking lijkt sterk lijkt op vergelijking (1). Hierin is  $\Delta p_0^*$  [-] de

verhouding tussen het drukverschil in vollast  $\Delta p_n$  [bar] bij  $Q^*=1$  en het drukverschil in 0-last  $\Delta p_0$  [bar] bij  $Q^*=0$  indien er geen debietverplaatsing is (zie Figuur 1, rode stippellijn). Deze wordt als volgt berekend:

$$\Delta p_0^* = \frac{\Delta p_0}{\Delta p_n} \quad (3)$$

De eenheid  $\Delta p$  is weergegeven in [bar] omdat bij het rekenen met  $k$ -waarden veelal met deze eenheid wordt gewerkt en om geen gebruik te hoeven maken van correctiefactoren. Dit consequent gebruik van eenheden voorkomt vergissingen. Het gebruik van [m] of [kPa] zal resulteren in dezelfde waarde van  $\Delta p_0^*$ . In voorbeeld 1 zijn de drukkens dimensieloos ten opzichte van de ontwerpdruk.

#### Ideale autoriteit en grondkarakteristiek bij een wijzigende pompdruk

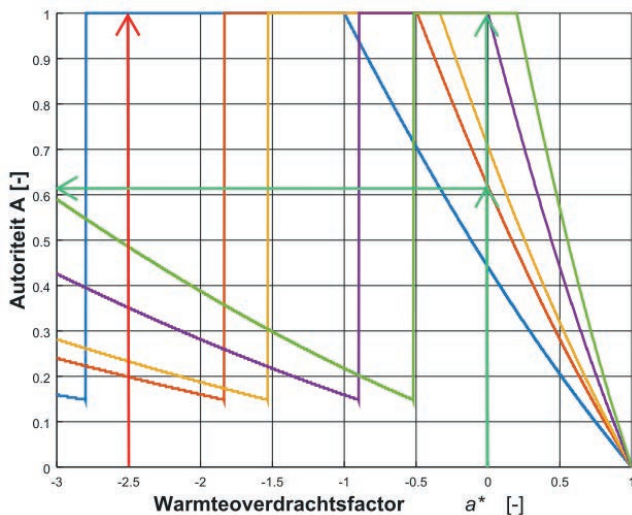
Voor vijf waarden van  $\Delta p_0^*$  wordt de ideale autoriteit en bijbehorende grondkarakteristiek berekend. Dit wordt gedaan voor een dalend drukverschil bij een dalend debiet voor  $\Delta p_0^*=0,5, 0,67$  en  $0,75$ . Verder wordt dit ter vergelijking gedaan voor een constant drukverschil  $\Delta p_0^*=1$  wat overeen komt met de huidige rekenwijze. Als laatste is dit gedaan om de invloed van een stijgend drukverschil voor  $\Delta p_0^*=1,25$ . Dit laatste is een benadering van een pomp met een constant toerental, waarbij de pompcurve wordt benaderd door een stijgend drukverschil bij een dalend debiet. De resultaten voor de keuze van de ideale autoriteit en klepkarakteristiek zijn weergegeven in Figuur 2. Hierbij zijn alleen praktische waarden van  $a^*=-3$  tot  $a^*=+1$  weergegeven. Merk op dat de ideale autoriteit gedefinieerd is de meest gelijkmatige vermogensafgifte bij een lineaire aansturing [2]. Een waarde van  $a^*=-2,5$  (zie voorbeeld 2) komt overeen met een luchtverwarmer met een constante wateraanvoer- en inblaasttemperatuur geselecteerd op  $90^\circ\text{C}/70^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ . Deze waarde geeft een praktische bovengrens van het toepassingsgebied in ons vakgebied weer.

## Voorbeelden 1a & 1b (bij Figuur 1)

**1a** Bij een constant drukverschil (rode lijn) lees bij  $Q^*=0$  het drukverschil  $\Delta p_0$  af: 1 [-]. Lees vervolgens bij  $Q^*=1$  (vollast) het drukverschil  $\Delta p_n$  af: 1 [-]. Met vergelijking (3) wordt voor  $\Delta p_0^* = 1/1$  de waarde 1 [-] bij een constant drukverschil berekend. Merk op dat vergelijking (2) nu reduceert tot de berekende vergelijking (1) (zie ook het intermezzo).

**1b** Bij een dalend drukverschil (rood gestippelde lijn) lees bij  $Q^*=0$  het drukverschil  $\Delta p_0$  af: 0,75 [-]. Lees vervolgens bij  $Q^*=1$  (vollast) het drukverschil  $\Delta p_n$  af: 1 [-]. Bij dit dalend drukverschil is de waarde  $\Delta p_0^* = 0,75/1 = 0,75$  [-].

**Figuur 2:** Keuze ideale autoriteit A [-] voor  $\Delta p^*_o=0,5$  (blauw); 0,67 (oranje); 0,75 (geel); 1 (paars) en 1,25 (groen) voor een equiprocentuele en een lineaire grondkarakteristiek



Figuur 2 laat zien dat de invloed van een niet-constant drukverschil van invloed is op de keuze van de autoriteit A (y-as, verticaal) bij een berekende waarde van  $a^*$  (x-as, horizontaal). De grafiek geeft ook de wijzigende basiskeuze van de grondkarakteristiek van de regelklep weer. Links in de grafiek resulteert de equiprocentuele grondkarakteristiek in de meest gelijkmatige vermogensafgifte. Rechts in de grafiek resulteert een lineaire grondkarakteristiek in het meest lineaire verband tussen aansturing en vermogensafgifte. De scheiding tussen de equiprocentuele en de lineaire grondkarakteristiek wordt telkens weergegeven door de verticale sprong in de grafiek. Deze sprongen verschuiven naar links bij een dalende waarde van  $\Delta p^*_o$ .

Ten opzichte van de bekende grafiek van een constant drukverschil  $\Delta p^*_o=1$  (paars), resulteert een dalend drukverschil, bijvoorbeeld  $\Delta p^*_o=0,5$  (blauw) in een groter toepassingsgebied waarin de lineaire grondkarakteristiek een meer gelijkmatige vermogensafgifte oplevert dan de equiprocentuele grondkarakteristiek. Dit wordt toegelicht aan de hand van voorbeeld 2.

Een dalende aanvoertemperatuur door een weerafhankelijke compensatie resulteert in een stijgende waarde van  $a^*$  waardoor het inzetbereik van Figuur 2 meer naar rechts verschuift op de x-as [3]. Ter herinnering, moderne installaties met LT-verwarming en/of HT-koeling hebben al een hogere  $a^*$  van zichzelf [1]. Dit betekent sneller de keuze voor een lineaire grondkarakteristiek.

## Voorbeeld 2 (bij Figuur 2)

Een warmtewisselaar met een luchtuitredetemperatuur van 20°C en een constant watertraject van 90-70°C wordt ingezet met een dalend drukverschil waarbij  $\Delta p^*_o=0,5$ . De waarde van  $a^*$  is:

$$a^* = \frac{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{a,uit,nom}}{\theta_{w,uit,nom} - \theta_{w,in,nom}} = \frac{(70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{(70^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C})} = -2,5 \quad (4)$$

Kijk op de x-as bij  $a^* = -2,5$  (rode pijl) zoek lijn  $\Delta p^*_o=0,5$  (blauw), aflezen ideale autoriteit:  $A=1$ , rechts van de sprong: kies lineaire grondkarakteristiek. Nu is de keuze van de grondkarakteristiek lineair en resulteert een autoriteit van 1 in de meest gelijkmatige vermogensafgifte. Dit voorbeeld wijst uit dat ook hoog gestookte installaties met een constante aanvoertemperatuur maar met een dalend drukverschil, niet langer default een equiprocentuele grondkarakteristiek bezitten.

Een stijgend drukverschil ( $\Delta p^*_o=1,25$ ; groen) resulteert ook in een verschuivend toepassingsgebied van de equiprocentuele klep. Bij een constant drukverschil en  $a^*=0$  en  $A=1$  is aangetoond dat hier het meest lineair verband wordt gevonden tussen aansturing en vermogensafgifte bij een lineaire klepkarakteristiek [2]. Hier is de vermogensafgifte het meest gelijkmatig. Bij een stijgende waarde van  $a^*$  resulteert een dalende autoriteit in een verbetering van dit lineair verband. Dit wordt weergegeven door de paarse lijn vanaf het punt (0,1) naar het punt (1,0). Hier wordt later op teruggekomen aan het einde van de volgende paragraaf.

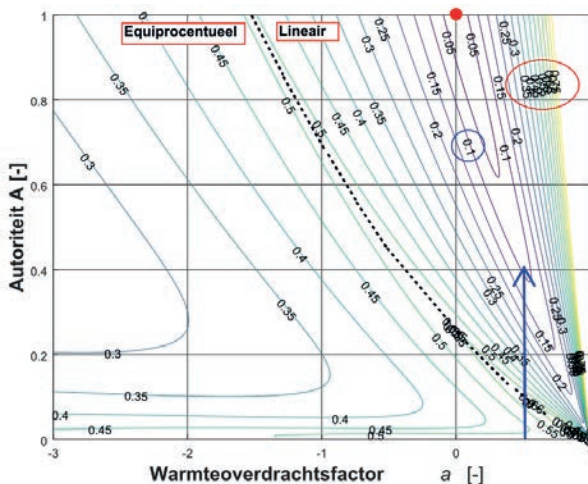
### Gelijkmatige vermogensafgifte

In de vorige paragraaf is in Figuur 2 het eindresultaat weergegeven met betrekking tot de niet-constant drukverschil van de circulatiepomp. Figuur 3 ( $\Delta p^*_o=1$ ) en Figuur 4 ( $\Delta p^*_o=0,5$ ) geven achterliggende informatie over hoe het drukverschil van invloed is op de keuze van de grondkarakteristiek en de autoriteit. Figuur 3 ( $\Delta p^*_o=1$ ) ligt aan de basis van de paarse lijn en Figuur 4 ( $\Delta p^*_o=0,5$ ) is de basis van de blauwe lijn, beide in Figuur 2. Ondanks het feit dat de lijnen in Figuur 2 de gelijkmatigheid van de vermogensafgifte tonen bij verschillende drukverschillen, zijn de lijnen niet uitwisselbaar.

### Voorbeeld 3 (bij Figuur 2)

Een warmtewisselaar met een luchtuitredetemperatuur van 20°C heeft een watertraject van 50-40°C waarbij de watertemperatuur weersafhankelijk daalt van 50°C naar 30°C. De waarde van  $a^*$  is nu 0. Bij een constante opvoerhoogte ( $\Delta p^*_o=1$ ; paars) resulteert een lineaire grondkarakteristiek met een autoriteit  $A=1$  in de meest gelijkmatige vermogensafgifte (groene pijlen). Bij een dalende opvoerhoogte ( $\Delta p^*_o=0,67$ ; oranje) geeft de lineaire grondkarakteristiek ook de meest gelijkmatige vermogensafgifte maar nu bij een autoriteit van  $A\approx 0,61$ .

In Figuur 3 zijn de lijnen van de gelijke standaard deviatie  $s$  of de "mate van gelijkmatigheid van de vermogensafgifte" [2], voor combinatie van warmteoverdrachtcoëfficiënt  $a^*$  en autoriteit  $A$  voor een constant drukverschil:  $\Delta p^*_o=1$  gegeven. Een kleinere waarde van  $s$  betekent een meer gelijkmatiger vermogensafgifte bij lineair aansturing. In de grafiek is rechts - voor een lineaire klep - te zien dat de contourlijnen vrij dicht bij elkaar lopen (rode cirkel). Dit betekent dat de mate van gelijkmatigheid vrij snel afneemt bij een stijgende  $a^*$ . Ter illustratie, vergelijk dit met hoogtelijnen op een kaart: waar de lijnen dicht op elkaar staan, is de helling het steilste. Het gewenste 1-op-1 verband tussen aansturing en vermogensafgifte daalt hier dus snel. In de praktijk betekent



**Figuur 3:** Weergave mate van gelijkmatigheid van vermogensafgifte (of standaarddeviatie  $s$ ) en de keuze van de beste grondkarakteristiek en bijbehorende autoriteit bij een constant drukverschil:  $\Delta p^*_o=1$

dit dat de gelijkmatigheid van de vermogensafgifte van het proces terugloopt. Links in de grafiek zijn de lijnen van een equiprocentuele grondkarakteristiek weergegeven. De scheiding tussen beide is weergegeven door middel van de zwart gestippelde lijn.

Ter vergelijking is in Figuur 4 het resultaat van een niet-constant drukverschil  $\Delta p^*_o=0,5$  weergegeven. In de eerste plaats is te zien dat het punt van de meest gelijkmatig vermogensafgifte (standaarddeviatie  $s=0$ ) naar links is verschoven van (0,1) naar circa (-1,1). Dit punt is in beide grafieken weergegeven door een rode punt. Dus is de gelijkmatigheid van de vermogensafgifte belangrijk, dient de invloed van het drukverschil tijdens de klepselectie beoordeeld te worden.

In de tweede plaats is te zien dat de onderlinge afstanden tussen de contourlijnen groter zijn. In vergelijking met de helling van een berg, deze is nu minder steil. Dit betekent dat er in een groter gebied een klep te selecteren is met een vergelijkbare of betere gelijkmatige vermogensafgifte. Praktisch gezien, de klepselectie wordt minder kritisch. Dit is toegelicht in voorbeeld 4.

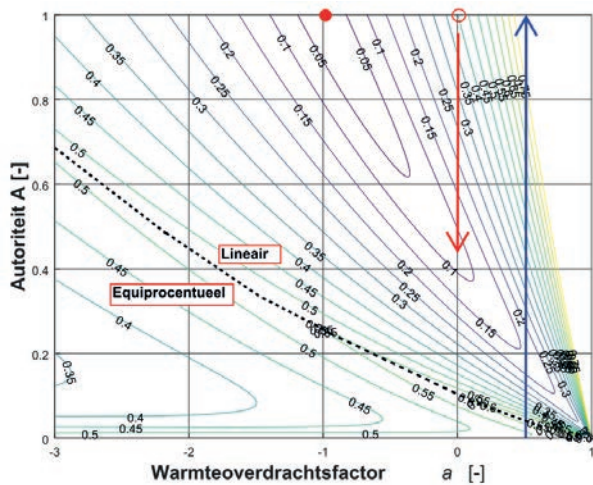
In de derde plaats laat Figuur 4 zien dat voor veel waarden van  $a^*$  een lineaire klep met een hogere autoriteit de meest aangewezen

### Voorbeeld 4 (bij Figuur 3 en Figuur 4)

Een warmtewisselaar met  $a^*=-0,5$  resulteert met een lineaire klep en een autoriteit van  $A=0,4$  in een gelijkmatigheid in de vermogensafgifte bezitten van  $s\approx 0,1$  (Figuur 3, blauw cirkel) indien het drukverschil constant is:  $\Delta p^*_o=1$  (Figuur 3, blauwe lijn).

Dezelfde warmtewisselaar met  $a^*=-0,5$  zal met dezelfde autoriteit  $A=1$  maar bij een dalende drukverschil van  $\Delta p^*_o=0,5$  een gelijkmatigheid in de vermogensafgifte bezitten van ca.  $s>0,75$  (Figuur 4, blauwe pijl). Volledigheidshalve, hoe kleiner  $s$  is, des te gelijkmatiger de vermogensafgifte bij een lineaire aansturing. Een dalende opvoerhoogte en gelijke autoriteit resulteert dus in dit voorbeeld in een minder gelijkmatige vermogensafgifte.

grondkarakteristiek is. Voor het praktische toepassingsgebied in ons vakgebied, van  $a^*=-2,5$  (zie voorbeeld 1) tot  $a^*=+1$ , betekent dit dat bij  $\Delta p^*_0=0,5$  een lineaire grondkarakteristiek veelal resulteert in de meest gelijkmatige vermogensafgifte. De scheidslijn tussen lineair en equiprocentueel is de zwart gestippeld lijn. Dit specifiek voor warmtewisselaar aangesloten volgens module 5 [6].



**Figuur 4:** Weergave mate van gelijkmatigheid van vermogensafgifte (of standaarddeviatie  $s$ ) en de keuze van de beste grondkarakteristiek en bijbehorende autoriteit bij een constant drukverschil:  $\Delta p^*_0=0,5$

In de vierde plaats is te zien (Figuur 4) dat rechts van  $a^*=-1$  een lineaire klep met dalende autoriteit gekozen dient te worden voor een gelijkmatige vermogensafgifte. Vanaf  $a^*=0$  tot  $a^*=+1$  daalt het lineair verband zeer sterk indien

een hoge autoriteit gekozen wordt. De contourlijnen lopen hier snel op van  $s=0,2$  naar  $s=0,75$ . Dit betekent dat zonder aanvullende maatregelen, een dalend drukverschil in dit gebied een verslechtering geeft van het gezochte lineaire verband. De conclusie van deze paragraaf is dat een dalend drukverschil kansen biedt, maar ook onbedoelde risico's kan hebben. In ieder geval is voor een optimale regelstrategie een equiprocentuele grondkarakteristiek en een zo hoog mogelijke autoriteit niet langer de beste default keuze in ons vakgebied.

We komen terug op een eerdere opmerking dat bij een stijgende waarde van  $a^*$  een dalende autoriteit resulteert in een verbetering van dit lineair verband. Een voorbeeld van een grote waarden van  $a^*$  is een wateraanvoertemperatuur welke wordt gecorrigeerd op basis van de klepstand [3]. Ook werd er boven gesproken over aanvullende maatregelen. In Figuur 3 en Figuur 4 zijn in de gebieden rechtsboven geen contourlijnen getekend. Dit betekent dat  $s>0,75$ . Dit zou geïnterpreteerd kunnen worden als dat een lineaire grondkarakteristiek met een dalende autoriteit altijd beter zou zijn. Dit is niet het geval. Dit speciale gebied vraagt om aanvullende maatregelen. Deze maatregelen kunnen zijn dat a) er een klep met een bovenlineaire grondkarakteristiek geselecteerd dient te worden of b) dat de lineaire aansturing in combinatie met een lineaire klep gecorrigeerd dient te worden door een bovenlineaire correctie. Er zijn fabrikanten op de markt die deze mogelijkheid hebben. Hopelijk kan met dit artikel hier ook praktische invulling aan gegeven worden.

**$K_v$ -sprong**

Naast een lineair verband tussen aansturing en vermogensafgifte, is ook de minimale regelbaarheid van belang bij de selectie van een regelklep. Deze minimale regelbaarheid wordt ook wel de  $k_v$ -sprong genoemd, waarbij gebruik wordt gemaakt van de  $k_{v0}$  waarde. Dit is de opgegeven niet werkelijk optredende volumestroom door een gesloten regelafsluiter onder genormeerde condities [6]. Met deze  $k_{v0}$ -waarde wordt nu het minimum debiet berekend door vergelijking (2) met behulp van  $k_{v0}$  om te schrijven naar de onderstaande vergelijking:

$$Q^* = \frac{\Delta p_0^*}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_{v0}^2} - 1\right]\right) + \Delta p_0^* - 1}} \quad (5)$$

**Voorbeeld 5 (bij Figuur 3 en Figuur 4)**

Figuur 3: een warmtewisselaar met  $a^*=0$ , geregeld met een lineaire klep en een autoriteit van  $A=1$ , resulteert in een gelijkmatigheid in de vermogensafgifte van  $s=0$  indien het drukverschil constant is:  $\Delta p^*_0=1$  (Figuur 3, rode punt).

Figuur 4: dezelfde warmtewisselaar, met een dalende drukverschil van  $\Delta p^*_0=0,5$  met een autoriteit van  $A=1$ , heeft een gelijkmatigheid van  $s=0,4$  (rode cirkel). Deze gelijkmatigheid kan verbeterd worden door de autoriteit te verlagen van  $A=1$  naar  $A \approx 0,45$  (rode pijl) waarbij  $s$  daalt tot ongeveer 0,09. De lagere autoriteit resulteert hier in een meer gelijkmatige vermogensafgifte.

Met de huidige spreadsheet programma's is een verdere vereenvoudiging niet noodzakelijk. Echter, in de literatuur is dit wel gedaan en voor de volledigheid wordt deze lijn hier gevolgd. Hierdoor wordt er ook een verband gelegd tussen de uitgebreide vergelijking (5) en de vereenvoudigde vergelijking (6). Omdat de  $k_{vs}$ -waarde ten opzichte van de  $k_{v0}$  waarde groot is, kan de uitgebreide vergelijking korter geschreven worden door de volgende benadering:

$$Q_0^* \cong \frac{\Delta p_0^*}{\sqrt{A} \frac{k_{vs}}{k_{v0}}} \quad (6)$$

Hierin is  $Q_0^*$  [-] het debiet behorend bij  $k_{v0}$ . In de oorspronkelijke vergelijking, met een constant drukverschil, staat in de teller in plaats van de waarde  $\Delta p_0^*$  een constante waarde van 1. Hieruit kan direct worden afgelezen dat een dalend drukverschil resulteert in een verlaging van het minimum debiet en daarmee een verlaging van de vermogenssprong. Ook heeft een weersafhankelijke correctie [3] een positief effect zoals in voorbeeld 6 is uitgewerkt.

## Voorbeeld 6

De warmtewisselaar van voorbeeld 1 heeft een  $a^* = -2,5$  ( $90^\circ\text{C}/70^\circ\text{C}/20^\circ$ ) en een autoriteit van  $A=0,5$ . De verhouding  $k_{vs}/k_{v0}$  van de regelklep bedraagt 50. De waarde van  $\Delta p_0^* = 0,75$ . Het minimum debiet  $q_{m,0}^*$  [-] wordt nu met vergelijking (6):

$$q_{m,0}^* \cong \frac{0,75}{\sqrt{0,5} \cdot 50} = 0,021 \quad (7)$$

Het minimum vermogen voor deze luchtverwarmer bedraagt dan:

$$P_0^*(q_{m,0}^*) = \frac{q_{m,0}^* \cdot (1 - a^*)}{1 - q_{m,0}^* \cdot a^*} = \frac{0,021 \cdot (1 - [-2,5])}{1 - 0,021 \cdot -2,5} = 0,071 \quad (8)$$

Indien een weersafhankelijke regeling wordt toegepast waarbij de watertemperatuur daalt tot  $50^\circ\text{C}$ , dan stijgt de waarde van  $a^*$  van  $-2,5$  naar  $-2,0$ . Het minimum vermogen daalt dan van  $7,1\%$  naar  $6,1\%$ . Ter illustratie, bij een constant drukverschil en een constante wateraanvoertemperatuur is deze waarde  $9,2\%$ .

Vergelijking (6) geeft ook aan hoe de vermogenssprong gereduceerd kan worden. Dit kan door een betere klep met een grotere verhouding van  $k_{vs}/k_{v0}$ . Het kan ook door het kiezen van een hogere autoriteit  $A$ . Dit laatste is minder efficiënt omdat de autoriteit  $A$  onder het wortelteken staat. Een verhoging van de autoriteit resulteert nu niet een even grote daling van de vermogenssprong. Het verlagen van het drukverschil geeft daarentegen wel een directe verlaging van de vermogenssprong tot gevolg. Deze verlaging van de vermogenssprong zal echter niet altijd volledig benut kunnen worden. Bij een luchtverwarmer in een luchtbehandelingskast met warmterugwinning, zal de regelklep niet openen bij een buitentemperatuur van  $20^\circ\text{C}$  maar bij een (veel) lagere buitentemperatuur, bijvoorbeeld  $0^\circ\text{C}$  waarbij de wateraanvoertemperatuur hoger is. Meerdere gebruikers (bijvoorbeeld naverwarmers) kunnen ook al vermogen vragen waardoor het totaal debiet ook hoger is. Al gevolg, hierdoor is het drukverschil hoger dan het minimum van  $\Delta p_0$  (Figuur 1). Ondanks deze kanttkening betekent het wel dat de vermogenssprong gereduceerd kan worden indien een dalend drukverschil ingesteld is.

### Conclusie

Om het debiet als functie van de klepstand te berekenen, wordt gebruik gemaakt van de aanname dat het drukverschil constant is. Met de opkomst van (moderne) pompregelingen is het gewenst om het effect van een stijgend en een dalend drukverschil in deellast te kunnen berekenen.

De conclusie in dit artikel is dat het toepassen van een dalend drukverschil betekent dat de equiprocentuele klepkarakteristiek niet altijd de default keuze is. Voor het meest lineaire verband tussen aansturing en vermogensafgifte resulteert een lineaire klepkarakteristiek in combinatie met dalende opvoerhoogte in deellast in een meest gelijkmatige vermogensafgifte. Ook resulteert een afvallende karakteristiek in een meer groter gebied waarin de combinatie van  $a^*$  en  $A$  resulteren in een gelijkmatige vermogensafgifte: de klepselectie wordt minder kritisch. Ook is aangetoond dat het een dalende drukverschil mogelijk is om de zogenaamde  $k_v$ -sprong te verminderen. Dit heeft het voordeel dat de minimale regelbaarheid wordt verbeterd rondom het 0-gebied.

### Referenties

1. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (1), TVVL Magazine, 01-2017
2. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (3), TVVL Magazine 10-2017
3. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (4), TVVL Magazine 09-2018
4. Brink, A.H.T.M. van den, Rekenen met warmtewisselaars (5a), TVVL Magazine 11-2018
5. Recknagel, H., Schramek, E.R., Sprenger, E., Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik
6. ISSO-publikatie 44, Ontwerp van hydraulische schakelingen voor verwarmen, ISBN 90-5044-064-9, 1998

# Intermezzo: afleiding variabel drukverschil

De vergelijking voor een constant drukverschil is:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)}} \quad (9)$$

Hierin is de waarde 1 in de teller de vereenvoudigde weergave van het constante drukverschil [4] en vormt gelijk het aanknopingspunt. Deze vergelijking wordt uitgebreid van een constant drukverschil naar een variabel drukverschil.

$$\left[\frac{\left(\frac{Q}{k}\right)}{\left(\frac{Q_n}{k_n}\right)}\right]^2 = \frac{\Delta p}{\Delta p_n} = 1 \quad (10)$$

Voor een lineair verband worden de volgende randvoorwaarden aangehouden waarbij het drukverschil  $\Delta p(Q^*)$  een functie is van het debiet  $Q^*$ :

$$\Delta p(0) = \Delta p_0^* \cdot \Delta p_n \quad (11)$$

$$\Delta p(1) = \Delta p_n \quad (12)$$

Hierin is  $\Delta p_0^*$  een factor tussen 0 en 1 voor een dalend drukverschil bij een dalend debiet, 1 voor een constant drukverschil en groter dan 1 bij een stijgend drukverschil bij een dalend debiet. De waarde  $\Delta p_0^*$  wordt opgegeven voor de situatie waarbij het debiet 0 bedraagt. Hieruit volgt:

$$\Delta p\left(\frac{Q}{Q_n}\right) = \Delta p(Q^*) = \Delta p_n(1 - \Delta p_0^*) \cdot Q^* + \Delta p_0^* \cdot \Delta p_n \quad (13)$$

Het dimensieloze debiet  $Q/Q_n$  [-] wordt verkort geschreven als  $Q^*$  [-]. Nu is het drukverschil geschreven als functie van het debiet  $Q^*$ . Vervolgens wordt vergelijking (10) in vergelijking (9) opgenomen en daarna wordt vergelijking (10) met vergelijking (13) herschreven:

$$Q^* = \frac{\frac{\Delta p(Q^*)}{\Delta p_n}}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)}} = \frac{\frac{\Delta p_n(1 - \Delta p_0^*) \cdot Q^* + \Delta p_0^* \cdot \Delta p_n}{\Delta p_n}}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)}} \quad (14)$$

Het drukverschil van het ontwerp  $\Delta p_n$  valt eruit omdat deze in de beide termen in de teller en in de noemer voorkomt:

$$Q^* = \frac{(1 - \Delta p_0^*) \cdot Q^* + \Delta p_0^*}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)}} \quad (15)$$

Vervolgens wordt  $Q^*$  geïsoleerd en de vergelijking herschreven en volgt de eindvergelijking:

$$Q^* = \frac{\Delta p_0^*}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)} + \Delta p_0^* - 1} \quad (16)$$

Met deze vergelijking is het mogelijk om het debiet te berekenen bij een veranderend drukverschil van de circulatiepomp. Bij een constant drukverschil geldt  $\Delta p_0^* = 1$  en reduceert vergelijking (16) tot:

$$Q^* = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)} - 1 + 1} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + A \left[\frac{k_{vs}^2}{k_v^2} - 1\right]\right)}} \quad (17)$$

Dit is de bekende vergelijking (6) voor een constant drukverschil.